

Разработка гиротронного комплекса 28 ГГц/20 кВт для оптимизации синтеза CVD-алмазов

С.А. Богданов¹, А.Л. Вихарев¹, М.Ю. Глявин¹, А.М. Горбачев¹, М.В. Каменский¹, М.В. Морозкин¹, А.А. Орловский^{1,2}, М.Д. Проявин¹, Д.И. Соболев¹, Е.А. Солуянова¹, Е.М. Тай¹, В.В. Холопцев¹

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород

²Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород

Аннотация: в данной работе рассматриваются перспективы использования новых технологических гиротронных комплексов для синтеза CVD-алмазов, анализируются преимущества гиротронного воздействия на процесс осаждения и оценивается потенциал данной технологии для промышленного применения. Особое внимание уделяется вопросам энергоэффективности, контроля параметров роста и возможностям масштабирования процесса. Результаты исследований демонстрируют, что сочетание гиротронных систем и CVD-метода открывает новые пути для создания алмазных материалов с заданными свойствами, что может существенно повлиять на развитие современных высокотехнологичных производств.

Ключевые слова: гиротрон, CVD, ЭОС, преобразователь, МЭС, CMPS, синтез

1. Введение

Современные гиротронные комплексы [1] играют ключевую роль в развитии высокотехнологичных отраслей науки и промышленности, включая термоядерный синтез, радиолокацию, спектроскопию и материаловедение. Их способность генерировать мощное когерентное излучение в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн открывает новые возможности для обработки материалов и синтеза перспективных структур, таких как искусственные алмазы и нанопорошки оксидов металлов.

В настоящее время большое распространение получила технология синтеза алмаза из газовой фазы (chemical vapor deposition – CVD), когда активация газовой смеси происходит с помощью СВЧ-разряда [2]. Уникальные свойства алмаза и возможности CVD технологии определяют широчайший спектр его возможных применений [3]. Несмотря на значительный прогресс CVD технологии, широкое применение CVD алмаза высокого качества в технике и научных исследованиях до сих пор сдерживается высокой ценой из-за относительно низкой скорости роста. Скорость роста алмаза при CVD синтезе в значительной мере зависит от качества получаемого алмаза. Повышение содержания углерода в газовой смеси, как правило, приводит к увеличению скорости роста алмаза и одновременно к ухудшению его качества (увеличению содержания неалмазной фазы, ухудшению кристаллического совершенства).

2. Гиротрон и магнито-экранированная система

Большинство современных приложений используют гиротроны, работающие на второй гармонике гирочастоты, что позволяет использовать обычные «тёплые» соленоиды с относительно низкими значениями магнитных полей. Однако в процессе длительного (недели, месяцы) рабочего цикла, в работе прибора могут наблюдаться нестабильности и срывы генерации со второй гармоники на основной циклотронный резонанс. Это может приводить к остановке работы СВЧ-комплекса и всех, связанных

с ним, длительных и дорогостоящих технологических процессов. Кроме того, как правило КПД генерации гиротронов на второй гармонике ниже, чем у гиротронов на первой гармонике, что при необходимости большей мощности СВЧ-излучения вынуждает работать на больших значениях тока и напряжения. Это негативно сказывается как на стоимости источников питания, так и на ресурсе различных узлов гиротрона. В связи с этим целесообразным является осуществление работы гиротрона на первой гармонике, что позволило бы достичь более высокого КПД (при условии сохранения мощности потребления магнита) и большей стабильности одномодовой генерации.

В данной работе ключевым компонентом являлся новый технологический гиротронный комплекс, работающий на частотах 28, 35, 45, 95 ГГц [4]. Особенностью данного комплекса является использование магнито-экранированной системы (МЭС) [5], изображенной на рисунке 1, что позволяет работать на основном циклотронном резонансе на частотах до 45 ГГц, используя экранированные теплые соленоиды.

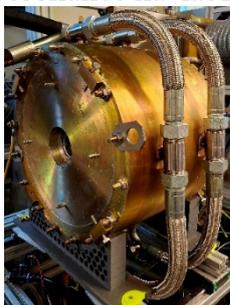


Рисунок 1. Магнито-экранированная система и гиротрон.

Однако из-за малых полей рассеяния работа с МЭС требует специальной электронно-оптической системы (ЭОС) и использования экранированной катодной катушки и трёх коллекторных катушек. Правильный подбор токов в коллекторных катушках позволяет высадить электронный пучок в нужном месте на коллекторе с требуемым распределением плотности мощности, что очень важно для безопасной работы гиротрона. В ходе исследований гиротрона на частоте 28 ГГц была получена мощность до 23 кВт и КПД до 55 % при ускоряющем напряжении 23 кВ и токе электронного пучка до 2,3 А. С целью обеспечения расчетного электронно-волнового взаимодействия был оптимизирован профиль магнитного поля для ЭОС, обеспечивающий радиус пучка в резонаторе равный 3 мм. В качестве рабочей была выбрана мода на второй гармонике циклотронного резонанса TE_{12} , спектр мод вблизи которой достаточно редок, что увеличивает шансы на устойчивую одномодовую генерацию.

3. Преобразователь и система управления

Большинству приложений использующих гиротроны, требуется выходное излучение в виде гауссова волнового пучка. Для решения этой задачи была рассчитана и изготовлена линия передачи, изображенная на рисунке 2, состоящая из волноводного перехода от лампы к компенсатору, который в свою очередь снижает механическую нагрузку на тракт при термических расширениях. Также в состав линии входил медный преобразователь из моды TE_{12} в моду TE_{92} со сложной внутренней структурой, и блок согласующих зеркал (MOU) с охлаждением, который позволяет реализовать окончательное преобразование выходного излучения в гауссов волновой пучок высокого качества и поглотить паразитное излучение в стенках MOU [6].

Также стоит отметить, что была изготовлена копия преобразователя с помощью аддитивной технологии CMPS (Chemical Metallization of Photopolymer-based

Structures) создания элементов микроволновой электроники со сложной формой поверхности [7]. Данная технология предусматривает покрытие медью исходных фотополимерных деталей с возможностью последующего удаления самого полимера.



Рисунок 2. Линия передачи в сборе и отдельно преобразователь: 1 – МОУ, 2 – преобразователь, 3 – компенсатор, 4 – переход.

Такой подход значительно сокращает временные и финансовые затраты на изготовление деталей, позволяет создавать медные изделия сложной формы, что открывает большие возможности для создания исследовательских установок вакуумных СВЧ-комплексов. В ходе экспериментов новый преобразователь полностью повторил результаты преобразователя, сделанного классическим методом с помощью ЧПУ-станков.

Ещё одной особенностью данного гиротронного стенда является интеграция новой системы управления (СУ) и автоматизации [8]. Она позволяет измерять поглощённую мощность во всех контурах охлаждения гиротронного комплекса что даёт возможность вычислить мощность, попадающую в нагрузку, без использования калориметра за счёт применения баланса мощностей. Это становится особенно актуально, когда из-за наличия сильных отражений от нагрузки, системы измерения мощности на основе СВЧ диодов с ответвителями начинают работать некорректно. Также частью данной СУ является система измерения и контроля токов и напряжений в катодной и трёх коллекторных катушках. Это крайне необходимо при использовании МЭС, которая имеет резкий спад магнитного поля в области коллектора и катода гиротрона и, следовательно, сложную топологию электронного потока.

4. Синтез алмазных дисков

В последние годы проводятся исследования возможности увеличения удельного энерговыклада (микроволновой мощности, поглощаемой в единице объема плазмы) в CVD реакторах с целью повышения скорости роста алмаза. Одним из основных способов увеличения удельного энерговыклада в наиболее распространённых реакторах, работающих на частоте 2,45 ГГц, является повышение рабочего давления газа [9], однако при этом размеры плазмы и площадь осаждения сильно уменьшается. Другой способ повышения удельного энерговыклада – это создание реактора с усиленным электрическим полем вблизи держателя подложки специальной формы, что также приводит к заметному уменьшению размеров плазмы [10]. В настоящее время в 2,45 ГГц CVD реакторах достигнуты высокие скорости роста монокристаллического алмаза высокого качества, например, 40 мкм/час при давлении газовой смеси 300 Торр и энерговыкладе 400 Вт/см³. Для поликристаллических алмазных плёнок хорошего качества возможно достижение скорости 12 мкм/час при небольшом диаметре подложки 40 мм и даже 30-35 мкм/час, но на подложке малого размера, диаметром не более 20 мм. Скорость роста поликристаллического алмаза высокого качества на подложках большого диаметра составляет, как правило, всего 1-2 мкм/час.

В ИПФ РАН было предложено принципиально новое решение проблемы низкой скорости роста CVD алмаза – вместо обычно применяемого в CVD реакторах излучения магнетрона на частоте 2,45 ГГц использовать коротковолновое излучение

гиротрона на частоте 28 ГГц. Повышение частоты позволяет значительно увеличить концентрацию электронов в плазме и удельный энерговыход. Для реализации этого подхода в ИПФ РАН был создан CVD реактор для синтеза алмаза рисунок 3(а), в котором СВЧ разряд создается в области пересечения когерентных пучков электромагнитного излучения, рисунок 3(б). Два фокусирующих зеркала направляют СВЧ излучение в область над подложкой, около которой поддерживался СВЧ разряд. К зеркалам излучение доставляется через систему зеркал. Образование двух когерентных пучков с одинаковой интенсивностью происходит на выходе из сверхразмерного прямоугольного волновода вследствие эффекта мультипликации изображения в ходе распространения электромагнитной волны. Квазигауссов пучок подается на вход волновода из сверхразмерного круглого волновода с гофрированной поверхностью. Такой волновод обеспечивает распространение электромагнитной волны с близким к гауссову поперечному распределению поля. На вход этого волновода поступает линейно поляризованное СВЧ излучение от гиротрона. В такой схеме создания когерентных пучков напряженность электрического поля в них параллельна поверхности подложки (ТЕ-поляризация).



Рисунок 3. а) Общий вид CVD реактора для синтеза алмаза на основе гиротрона. б) Схема плазменного реактора с двумя пересекающимися волновыми пучками: 1 – круглый волновод, 2 – волновой делитель, 3 – плоские зеркала, 4 – нижние фокусирующие зеркала, 5 – верхние фокусирующие зеркала, 6 – волновые пучки, 7 – газоразрядная плазма, 8 – держатель подложки, 9 – вакуумные окна для ввода микроволнового излучения в разрядную камеру.

Экспериментально было установлено, что в области пересечения пучков образуется плотная плазма с концентрацией близкой к критической. Форма плазмы близка к тонкому слою, локализованному вблизи подложки. При использовании зеркал, обеспечивающих сильную фокусировку пучков, плазма сосредоточена в одной пучности, что позволяет достигнуть рекордных энерговыходов $1000-1500 \text{ Вт/см}^3$. Было установлено, что на таком реакторе возможно осаждение поликристаллических пленок и монокристаллических эпитаксиальных слоев. Была достигнута скорость осаждения до 7 мкм/час для поликристаллических пленок диаметром до 75 мм, а для монокристаллов получены чрезвычайно высокие скорости роста до 120 мкм/час при высоком качестве получаемого алмаза на одной подложке размером 4x4 мм.

Однако, проведенные исследования показали, что с помощью излучения гиротрона на частоте 28 ГГц для получения плазмы над подложкой большой площади (диаметр порядка 75 мм) при имеющейся мощности гиротрона 10 кВт необходимо использование смеси водород-аргон-метан при высоком содержании аргона (порядка 60%). А наличие большого количества аргона приводит к существенному ухудшению качества получаемого алмаза, тогда как в реакторах на частоте 2,45 ГГц в смеси водород-метан возможно выращивание алмаза высокого качества, но с небольшой скоростью. Поэтому, основной идеей, обеспечивающей достижение большой скорости CVD роста алмаза высокого качества, является использование гиротрона большой мощности, которая позволит создавать плазму в смеси водород-метан и осуществлять

при этом осаждение алмаза на подложки большой площади. Результаты численного моделирования показали, что для получения плазмы над подложкой диаметром 75 мм в газовой смеси без аргона необходима мощность гиротрона около 20 кВт. Для этой цели в установку роста алмазов был интегрирован новый гиротронный комплекс 28 ГГц/20 кВт с МЭС, который описывался выше. При наладке комплекса излучение на выходе из линии передачи по форме было близко к гауссовому, а мощность в калориметрической нагрузке достигала значений в 20 кВт. Также была настроена и откалибрована система измерения мощности через баланс мощностей.

Первые проведенные эксперименты показали, что реактор с гиротроном мощностью 20 кВт позволяет создавать устойчивую плазму над подложкой диаметром 75 мм в газовой смеси с малым содержанием аргона, при котором он не оказывает существенного влияния на рост алмаза. В данный момент проведение экспериментов продолжается.

5. Заключение

В данной работе проведено исследование эффективности применения новых гиротронных комплексов с магнито-экранированной системой в установках CVD-синтеза алмазов. Показано, что использование таких систем позволяет существенно повысить стабильность генерации микроволнового излучения, улучшить энергоэффективность процесса и обеспечить более равномерный нагрев плазмы, что положительно сказывается на качестве синтезируемых алмазных плёнок. Полученные результаты демонстрируют перспективность внедрения гиротронных систем с МЭС в установки CVD-синтеза. Таким образом, применение новых гиротронных комплексов с МЭС открывает значительные возможности для совершенствования CVD-методов синтеза алмазов, что способствует развитию электроники, оптики и других высокотехнологичных отраслей.

Исследование выполнено в рамках проекта ИПФ РАН «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона» FFUF-2022–0007.

Список литературы

1. Thumm, M. State-of-the-Art of High-Power Gyro-Devices. Update of Experimental Results 2021. (KIT Scientific Reports; 7761); Update 2021.; KIT Scientific Publishing, 2021.
2. Asmussen J., Reinhard D.K. Diamond Films Handbook. Marcel Dekker, 2002.
3. R.S. Balmer, J.R. Brandon, S.L. Clewes, H.K. Dhillon et al. Chemical vapour deposition synthetic diamond: materials, technology and applications // J. Phys.: Condens. Matter 21 (2009) 364221.
4. M. D. Proyavin et al., "Results of the Study of a New Generation Technological Gyrotron System With High Power and Efficiency," in IEEE Electron Device Letters, vol. 44, no. 1, pp. 148-151, Jan. 2023.
5. M. D. Proyavin, V. N. Manuilov, I. G. Gachev, V. V. Maslov, M. V. Morozkin, A. N. Kuftin, E. M. Tai, and M. Y. Glyavin, A Magneto-Armored Warm-Solenoid Based System for K-Band Gyrodevices, Instruments and Experimental Techniques, vol. 63, no. 1, pp. 97–100, 2020, doi: 10.1134/S0020441220010078.
6. Gashturi, A. & Sobolev, D. & Denisov, Grigory & Proyavin, Mikhail & Morozkin, Mikhail & Chirkov, A.. (2024). Highly Efficient Gyrotron Mode Converter With a Launcher Changing Angular Spectrum of the Operating Mode. IEEE Transactions on Electron Devices. PP. 1-5. 10.1109/TED.2024.3479157.
7. Proyavin, M.D.; Morozkin, M. V.; Ginzburg, N.S.; Denisenko, A.N.; Kamenskiy, M. V.; Kotomina, V.E.; Manuilov, V.N.; Orlovskiy, A.A.; Osharin, I. V.; Peskov, N.Y.; et al. Experimental Studies of Microwave Tubes with Components of Electron–Optical and Electrodynamical Systems Implemented Using Novel 3D Additive Technology. Instruments 2022, 6, doi:10.3390/instruments6040081.
8. М. В. Каменский, М. В. Морозкин, М. Д. Проявин, А. А. Орловский // Усовершенствование автоматизации гиротронных комплексов на основе элементов современной микроэлектроники / // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2022. – Т. 1. – С. 432-436. – EDN SRJMUF.
9. C.J. Widmann, W. Müller-Sebert, N. Lang, C.E. Nebel. Homoepitaxial growth of single crystalline CVD-diamond, Diamond & Related Materials, 64, (2016), 1-7.
10. A.P. Bolshakov, V.Yu. Yurov, I.A. Fedorova, et al. Growth of homoepitaxial single crystal diamond by microwave plasma CVD in H₂-CH₄-O₂ gas mixtures at high microwave power densities. Diamond & Related Materials (2024).